

# 卷烟燃烧模型研究进展

李巧灵<sup>1,2</sup>, 陈晓东<sup>1</sup>, 李军<sup>1</sup>, 颜聪<sup>1</sup>, 辛洪人<sup>1</sup>, 王慧<sup>1</sup>, 黄朝章<sup>2</sup>,  
李跃锋<sup>2</sup>, 谢卫<sup>2</sup>, 张伟<sup>2</sup>, 傅辉<sup>2</sup>

1 厦门大学化学化工学院, 福建省厦门市思明南路 422 号 361005;

2 福建中烟工业有限责任公司技术中心, 福建省厦门市海沧区新阳工业区新阳路 1 号 361022

**摘要:** 综述国内外有关卷烟燃烧模型的研究进展。认为应在深入研究卷烟燃烧过程和机理的基础上, 建立全面系统准确的卷烟燃烧数学模型, 以便为工艺改进提供科学依据。

**关键词:** 卷烟燃烧模型; 烟气成分; 燃烧特性

doi: 10.3969/j.issn.1004-5708.2013.02.020

中图分类号: TS411 文献标识码: A 文章编号: 1004-5708 (2013) 02-0115-08

## Research progress in cigarette combustion model

LI Qiaoling<sup>1</sup>, CHEN Xiaodong<sup>1</sup>, LI Jun<sup>1</sup>, YAN Cong<sup>1</sup>, XIN Hongren<sup>1</sup>, WANG Hui<sup>1</sup>, HUANG Chaozhang<sup>2</sup>, LI Yufeng<sup>2</sup>, XIE Wei<sup>2</sup>,  
ZHANG Wei<sup>2</sup>, FU Hui<sup>2</sup>

1 College of Chemistry and Chemical Engineering, Xiamen University, Xiamen 361005, Fujian, China;

2 Technology Center of China Tobacco Fujian Industrial Co. Ltd., Xiamen 361022, Fujian, China

**Abstract:** Research progress in cigarette combustion model was reviewed. Suggestions were proposed that comprehensive, systematic and accurate mathematical model of cigarette combustion need to be established based on further research in combustion mechanism to improve blending technique.

**Keywords:** cigarette combustion model; cigarette smoke composition; combustion characteristics

研究卷烟燃烧过程中有害成份的形成过程以及各种变量(包括烟草成分、抽吸参数、烟支结构、卷烟材料、添加剂和加工措施等)对烟气组分分布的影响, 进而用数学和物理方法去分析卷烟的燃烧过程, 建立数学模型, 可以解决实验方法不能测定或者难以准确测定的物理过程和相关参数变化后的烟气组分分布规律, 从而有针对性地改良卷烟质量及吸食安全性, 对卷烟生产有一定的指导意义。本文针对国内外卷烟燃烧模型的研究进展进行了综述。

卷烟烟气是一种很复杂的气溶胶, 有 1/3 物质

来自烟草本身, 根据文献<sup>[1-5]</sup>, 表 1 概括了烟草成分与烟气中主要有害物质之间的关系。大部分烟气成分是卷烟燃烧过程中氧化、热解和蒸馏的产物, 随着烟气的形成温度范围(室温到 950℃), 及不同位置 O<sub>2</sub> 浓度不同<sup>[6]</sup>而变化。用数学和物理方法分析卷烟的燃烧过程, 建立数学模型, 模拟卷烟燃烧时的温度分布, 氧气分布以及烟气成分的形成情况等, 既可以对烟气成分的生成情况有更为理性的认识, 又为工艺条件的改进提供量化依据(如图 1 所示)。

**作者简介:** 李巧灵(1984—), 博士后, 主要从事生物物质的热处理研究, Tel: 0592-2182767, Email: liqiaoling@xmu.edu.cn

**通讯作者:** 陈晓东(1965—), 教授, 主要从事生物物质的干燥与热解研究, Tel: 0592-2182767, Email: xdc@xmu.edu.cn

**收稿日期:** 2012-01-09

表 1 烟草成分与主要有害物质的关系

烟草组分	烟气 烟碱	一氧 化碳	稠环 芳烃	氨	亚硝胺	氮氧 化合物	芳香胺	氰化氢	羰基 化合物	酚类	其他有 机成分
烟碱	√	√	√		√		√				--
硝酸盐				√	√	√		√			--
蛋白质		√	√	√			√	√	√	√	--
氨基酸		√	√	√			√	√	√	√	--
矿物元素		√									--
酯类		√	√						√		--
糖		√	√						√	√	--
果胶		√	√						√		--
纤维素		√	√						√	√	--
木质素		√	√							√	--
酚类		√	√							√	--
有机酸		√	√								--
蜡		√	√						√		--

注：√表示有关，--表示待确定。

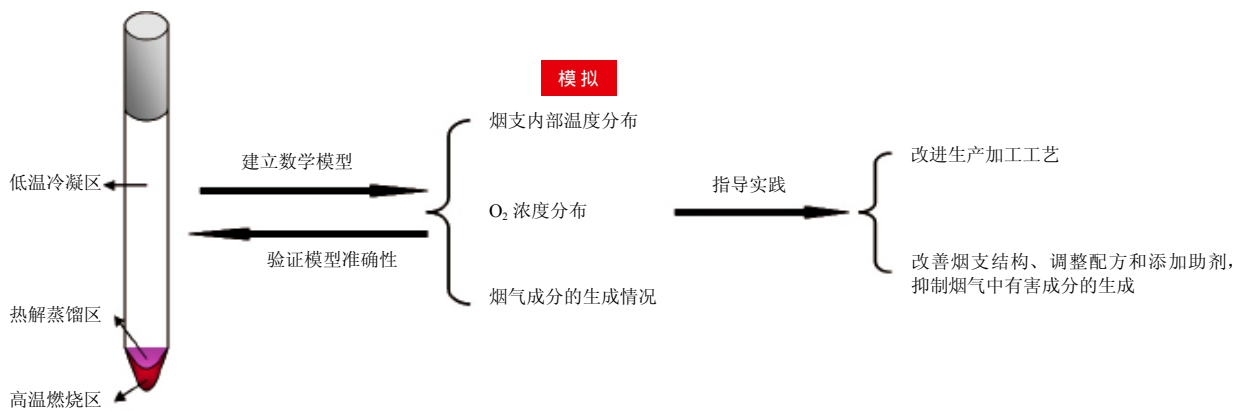


图 1 卷烟燃烧模型框架图

1 卷烟燃烧模型建立的背景

1981 年，Muramatsu 等<sup>[7]</sup>提出了烟支燃烧过程理论，烟支点燃后，被燃烧的那部分烟草将发生氧化、分解，其中许多有机物将被分解为二氧化碳、一氧化碳和水等，留下烟草无机物灰分。与此同时，由于燃烧点的温度很高，邻近燃烧端点的烟草有机物会在缺

氧的高温条件下蒸馏出来，并发生热分解，以气态、蒸汽态或半蒸汽态的形式进入烟气中，并留下残余的焦油。在吸烟过程中，初次燃烧分解产物或干馏产物又可能发生缩合、聚合、中和等反应，形成新的物质，存留于烟气中进入口腔，或沉降于未燃的烟草上再发生第二次燃烧和干馏。吸烟间歇进行，化学反应也依次反复发生。

利用数学模型模拟卷烟的燃烧过程是个很大的挑战, 因为吸烟涉及到很多复杂的现象, 例如均相和非均相的氧化, 烟气中含有上百种的化学物质, 卷烟内部温度随时间的变化, 浓度梯度, 以及气流变化等等。均相反应发生在气相或固相内部, 而非均相反应发生在气固界面, 想要获得这些化学反应速率的确切数据是非常困难的。因此一般被简化为一级反应, 并用阿伦尼乌斯方程描述反应的动力学。另外, 在卷烟燃烧区域的热流动力学也十分复杂, 阴燃时的加热速率是  $10\text{--}15^\circ\text{C}/\text{s}$ , 而吸燃时的升温速率可达  $300\text{--}500^\circ\text{C}/\text{s}$ 。根据早期的研究工作<sup>[8]</sup>, 在卷烟的前端,  $\text{O}_2$  浓度富足, 发生燃烧反应, 此时的温度以  $500^\circ\text{C}/\text{s}$  的速度上升至  $700\text{--}950^\circ\text{C}$ , 而在卷烟的内部,  $\text{O}_2$  极度缺乏, 燃烧反应放出的热量又导致温度的升高, 此时将发生蒸馏和热解反应, 不同的反应过程导致动力学参数有所不同。

## 2 卷烟燃烧模型的发展过程

卷烟燃烧模型始建于上世纪 60 年代, 发展至今, 按照卷烟燃烧模式的不同, 可分为阴燃模型和吸燃模型。卷烟燃烧循环中阴燃和吸燃的概念框架已经提出<sup>[9]</sup>, 在这个概念框架中, 对于卷烟吸燃的分析有限, 因为此过程的气体流速快速增加, 而且在燃烧区后端的烟草将出现预热现象; 而对于卷烟阴燃, 气体的流速是确定的, 所以此过程发生的反应在化学计量学和动力学的控制范围, 因此针对卷烟阴燃的模型较多。卷烟的燃烧过程可以看成是一个小型的化学反应系统, 其中包含烟草的热解和燃烧反应以及卷烟内部质量、能量和动量的传递。因此, 要建立卷烟的阴燃和吸热模型, 首先要建立烟草的热解和燃烧模型, 为后续卷烟燃烧模型的建立提供可靠的化学反应动力学数据, 其中包括反应的活化能, 指前因子和反应级数等等, 之后再加入质量、能量和动量传递方程以及其他相关的变量方程。

### 2.1 烟草热解反应动力学模型

虽然在卷烟燃烧内部主要可分为 2 个区域: 燃烧放热区和热解蒸馏吸热区, 但是除了  $\text{CO}$  和  $\text{CO}_2$  之外, 大部分的烟气组分来自热解蒸馏区, 因此目前文献中所报道的主要是烟草热解反应动力学模型。

针对焦油生成的烟草热解反应动力学模型已有文献报道。研究表明当烟草在一个无氧的气氛下进行非

等温加热, 气流速度的变化对气态产物生成速率的影响很小, 在烟草表面和气态物质之间的质量传递是十分迅速的, 产物的生成速率主要受化学反应动力学控制, 在其控制范围内所收集的动力学参数则被用于模拟卷烟的阴燃过程。在这些烟草热解反应动力学模型中, 有些模型是一维的<sup>[10-12]</sup>, 有些模型是二维的<sup>[13-14]</sup>, 而大部分的模拟数据则来源于热重实验。TGA 技术已经被广泛应用于研究生物物质的热解反应, 它也是研究烟草热解反应的有利工具, 其可在温和的升温速率条件下提供准确的热解反应实验数据。模型模拟中所使用的升温速率范围很广, 然而大部分的升温速率都要比实际卷烟在阴燃和吸燃条件下的升温速率慢很多。Muller 等<sup>[15]</sup>得到在空气条件下, 升温速率在  $5\text{--}300^\circ\text{C}/\text{min}$  范围内的动力学参数, 此模型所有的反应均假设为一级反应, 并利用阿伦尼乌斯公式对实验数据进行拟合, 确定了反应的活化能和指前因子。Encinar<sup>[16]</sup>根据气体的生成情况建立了低升温速率条件下的热解反应动力学模型。

烟草中大多数的有机物具有各种各样的热解产物, 甚至是相同的化学物质由于其所在的环境不同, 也会发生不同的反应。各种反应的分布经常与活化能的高斯分布保持一致。自 1985 年来, 活化能的高斯分布已经被用于研究生物物质的热解反应动力学, Avni 等<sup>[17]</sup>应用活化能的高斯分布研究木质素热解过程中挥发性物质的形成, 之后这种研究方法还被应用于许多的生物物质热解反应, 这其中就包括烟草的热解反应。Varhegyi 等<sup>[18]</sup>利用 TGA-MS 技术, 以活化能的高斯分布理论建立了烟草热解反应动力学模型。

最具综合性的烟草热解反应动力学模型来自 Bassilakis<sup>[19]</sup>和 Wojtowicz<sup>[20]</sup>, 他们利用 CFD 软件模拟了烤烟, 白肋烟, 香料烟热解过程中的烟气成分生成情况(焦油、尼古丁、 $\text{CO}$ 、 $\text{CO}_2$  和  $\text{NH}_3$  等)。实验在热分析仪上, 升温速率为  $1\text{--}100^\circ\text{C}/\text{min}$ , 气体产物通过傅里叶红外仪进行检测, 获得烟草热解反应的实验数据, 之后根据一级平行反应的假设以及活化能的高斯分布理论建立烟草热解反应动力学模型(见表 2), 通过试差法得到主要烟草成分在不同反应条件下所对应的指前因子  $A$ , 活化能  $E$ , 以及烟气成分的总生成量  $v^*$ 。但是此模型并未考虑到质量、能量和动量传递以及卷烟纸的渗透率等因素, 所以该模型对

某些物种的生成情况模拟得较为合理, 而对于另一些物种的生成情况则与文献报道值有很大的差别。因此, 在烟草热解反应动力学模型的基础上, 加入质量、能

量和动量传递方程以及其他相关的变量方程, 是建立卷烟燃烧模型的必要要求, 以达到模拟值与实验值吻合较好的理想状态。

表 2 烟草热解动力学模型<sup>[20]</sup>

动力学方程	各符号的定义
$\frac{v^* - v}{v^*} = \frac{1}{\sigma(2\pi)^{1/2}} \int_{-\infty}^{\infty} \exp\left[-A \int_0^t \exp\left(-\frac{E}{RT}\right) dt - \frac{(E - E_0)^2}{2\sigma^2}\right] dE$	<p><math>v^*</math>: 烟气成分的总生成量  <math>v</math>: 烟气成分的实时生成量  <math>\sigma</math>: 高斯分布的宽度  <math>A</math>: 指前因子; <math>T</math>: 温度  <math>E</math>: 活化能; <math>E_0</math>: 平均活化能</p>

## 2.2 卷烟阴燃和吸燃模型

对于卷烟的阴燃过程, 有 2 个很重要的控制参数: 燃烧区  $O_2$  的浓度以及热损失。Egerton<sup>[21]</sup> 和 Gagan<sup>[22]</sup> 研究了在自然对流条件下卷烟的阴燃过程, 假设卷烟的燃烧受  $O_2$  扩散的影响, 建立了一个 2 维的模型, 并预测了燃烧锥温度的分布特征。Jenkins 等<sup>[23]</sup> 测定了在阴燃过程中的密度变化以及对应的温度分布。根据实验所测得的温度和气体分布, Baker 等<sup>[24]</sup> 利用简化的能量和质量传递方程, 预测了稳态阴燃过程中化学产物的生成速率。Moussa 等<sup>[25]</sup> 建立了圆柱形纤维质的阴燃机理, 模型很好地解释了  $O_2$  的摩尔分率以及分压对阴燃速度和温度的影响。但此时的实验数据和理论研究还不能完全地定义阴燃的反应机理。1973-1981 年, Muramatsu 等<sup>[26]</sup> 全面研究了阴燃的性质, 通过 (1) 测量烟草的有效传热系数和比热容, (2) 对烟草进行热分析, (3) 测量  $O_2$  的浓度和放热量, (4) 建立热解蒸馏区的模型, 预测温度变化和密度变化, (5) 建立了一个卷烟阴燃的较全面的理论, 同时考虑燃烧区和热解蒸馏区, 从而预测了卷烟的阴燃速率和温度分布。Muramatsu 等假定在气固相间存在热平衡, 模型中展示了烟草在蒸发热解区存在 4 个步骤, 认为烟草由 4 种前躯体以及水分组成, 他们在烟草热解过程中生成 4 种挥发性产物, 并有焦油和灰炭形成。模型中所使用的物理参数见表 4, 该模型预测的卷烟阴燃速率和温度分布和实验值吻合较好。

自 1980 年以来, 大量的工作都主要关注多孔性物质燃烧模型的建立, 但却较少关注卷烟燃烧数学模型的建立。2003 年, Rostami 等<sup>[27]</sup> 致力于用 Fluent 软件建立一个模型, 包括卷烟燃烧过程中的质量, 能量和动量传递以及化学反应 (见表 5), 该模型把燃烧过程中卷烟纸透气度以及卷烟长度的变化也考虑进去。模型预测了卷烟阴燃过程中的温度变化特征, 物种的浓度变化以及燃烧速率, 都与实验值吻合较好, 模型中最重要的参数是卷烟纸的透气度, 即在卷烟边界  $O_2$  的质量传递, 以及表面的热传递系数, 但此模型仍有改进的空间。2006 年, 江威等<sup>[28]</sup> 利用模型模拟了卷烟阴燃时的温度场分布, 模拟结果与实验结果相符合。

目前, 对于卷烟的吸燃模型研究较少, 据我们了解, 仅有 2004 年, Saidi 等<sup>[29]</sup> 建立了可同时模拟卷烟阴燃和吸燃的 3 维模型 (见表 6), 并用该模型模拟了主流烟气中  $CO$ ,  $CO_2$  和  $O_2$  的产率 (见表 7) 以及  $CO$  递送量随抽吸口数的变化 (见图 2), 计算结果基本与实验结果保持一致; 2005 年, Yi 等<sup>[30]</sup> 模拟了不同的卷烟类型 (烤烟, 白肋烟, 香料烟) 对某些烟气组分在阴燃和吸燃时产率的影响, 但是该模型较为简化, 未考虑温度和浓度梯度, 某些预测结果与实验结果拟合较好, 但是也有些预测结果与实验结果有很大的差距, 这主要是由于该模型对于烟草的热物性研究较少, 烟草结构的变化, 二级热解反应, 传质传热过程都未加入到模型中。

表 3 卷烟的阴燃和吸燃模型

模型类型	研究内容	参考文献
阴燃	在自然对流条件下，假设卷烟的阴燃受 $O_2$ 扩散的影响，建立了一个 2 维的模型，并预测了燃烧锥温度的分布特征	Egerton et al, 1963 [21]
	根据实验所测得的温度和气体分布，利用简化的能量和质量传递方程，预测了稳态阴燃过程中化学产物的生成速率	Baker, 1977 [24]
	建立了圆柱形纤维质的阴燃机理，模型很好地解释了 $O_2$ 的摩尔分率以及分压对阴燃速度，温度的影响	Moussa et al, 1977 [25]
	全面研究阴燃的性质，建立模型用于预测燃烧速率，温度分布	Muramatsu et al, 1979 [26]
	模型预测了卷烟阴燃过程中的温度变化特征，物种的浓度变化以及燃烧速率	Hajaligol et al, 2003 [27]
吸燃	模拟卷烟阴燃时的温度场分布	江威等, 2006, [28]
	建立可同时模拟卷烟阴燃和吸燃的 3 维模型，并用该模型模拟了主流烟气中 $CO$ ， $CO_2$ 和 $O_2$ 的产率	Hajaligol et al, 2004 [29]
	模型模拟了不同的卷烟类型（烤烟，白肋烟，香料烟）对某些烟气组分在阴燃和吸燃时产率的影响	Yi et al, 2005 [30]

表 4 Muramatsu 等建立的模型中使用的物理参数<sup>[26]</sup>

(a) 热解反应表观活化能参数				
	反应 1	反应 2	反应 3	反应 4
反应级数 $n$	1	1	1	3
活化能 $E$ (Kcal/mole)	20.2	24.5	45.7	25.2
指前因子 $A$ (1/sec)	$6.27 \times 10^7$	$1.69 \times 10^8$	$5.99 \times 10^{14}$	$4.69 \times 10^6$
(b) 关于水分损失和热平衡的相关参数				
卷烟内部孔隙率 $\Phi$	0.659	烟草的比热 $C_{pv}$ (cal/g.K)		0.41
环境中水的蒸汽压 $P_{w\infty}$ (mm Hg)	10.5	焦炭的比热 $C_{pc}$ (cal/g.K)		0.25
卷烟比表面积 $Na$ (cm <sup>2</sup> /cm <sup>3</sup> )	68.7	水的比热 $C_{pw}$ (cal/g.K)		1.00
焦炭的导热系数 $K_{sf}$ (cal/sec.cm.K)	$7.56 \times 10^{-4}$	卷烟内部空隙空间平均内径 $Dp$ (cm)		0.0575
烟气的导热系数 $K_g$ (cal/sec.cm.K)	$1.08 \times 10^{-4}$	总孔隙率 $\Phi$		0.798
蒸发热 $Q_w$ (cal/g)	540	阴燃速度 $u$ (cm/min)		$4.43 \times 10^{-3}$
热解热 $Q_p$ (cal/g)	0	卷烟纸的厚度 $\delta$ (cm)		$3.70 \times 10^{-3}$

表 5 卷烟阳燃模型的模拟对象和数学方程<sup>[27]</sup>

模拟对象	数学方程	各符号的定义
热解反应 假设有 4 种热解前驱体	$\frac{\partial \rho_v}{\partial t} = \sum_{i=1}^4 \frac{\partial \rho_{vi}}{\partial t} - Z_{vi} \exp(-E_{vi} / RT_s) \rho \rho_{vi}^n$	$\rho_v$ : 第 i 种热解前驱体的质量浓度; $Z_{vi}$ : 指前因子; $T_s$ : 卷烟燃烧温度; $n$ : 反应级数
热解残留物的氧化反应 假设有 2 种热解残留物	$\frac{\partial \rho_{ci}}{\partial t} = -n_c f \frac{\partial \rho_v}{\partial t} - Z_{ci} \exp(-E_{ci} / RT_s)^{1/2} \rho_{O_2} \rho_{ci}$	$\rho_{ci}$ : 第 i 种热解残留物的质量浓度; $n_c$ : 化学计量系数; $f$ : 两种热解残留物所占比率
水分蒸发反应	$\frac{\partial \rho_w}{\partial t} = -Z_w \exp(-E_w / RT_s) \rho_w$	$\rho_w$ : 水分的质量浓度
灰分的形成	$\frac{\partial \rho_{ash}}{\partial t} = -n_{ash} \frac{\partial \rho_c}{\partial t}$	$\rho_{ash}$ : 灰分的质量浓度
气相物质传递	$Y_i \rho = \rho_i \frac{\partial \rho \phi Y_i}{\partial t} + \nabla(\rho V Y_i) = \nabla \cdot (\rho D \phi \nabla Y_i) + R_i(1 - \phi)$	$Y_i$ : 气相物质质量分数; $\rho$ : 气相混合物浓度; $\rho_i$ : 第 i 种气相物质浓度; $\phi$ : 烟草模型孔隙率; $V$ : 阴燃速率; $D$ : 扩散系数; $R_i$ : 氧化反应体积生成速率
固相能量方程	$(1 - \phi) \rho_s C_p \frac{\partial T_s}{\partial t} = \nabla \cdot (k_{s,eff} (1 - \phi) \nabla T_s) + h_{s-g} \left( \frac{A}{V} \right) (T_g - T_s) + S_{solid}$ $\frac{\partial}{\partial t} (\rho \phi h_g) + \nabla \cdot (\rho \phi h_g) = \nabla \cdot (k_g \phi \nabla T_g) + h_{s-g} \left( \frac{A}{V} \right) (T_s - T_g) + S_{gas}$	$\rho_s$ : 固体的质量浓度; $C_p$ : 固体比热容; $k_{s,eff}$ : 固体有效热导率; $h_{s,g}$ : 气-固界面有效传热系数; $A/V$ : 面体比; $T_g$ : 气相温度 $S_{solid}$ : 固相源项
气相能量方程	$S = - \left( \frac{\mu V}{K} + C \rho  V  \right) V$	$h_g$ : 气相显焓; $k_g$ : 气体热导率; $S_{gas}$ : 气相源项
动量方程		$\mu$ : 流体粘度; $K$ : 多孔介质渗透率; $C$ : 控制惯性项大小的经验常数

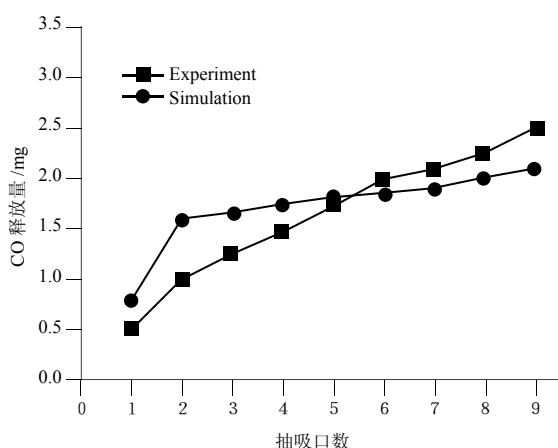
表 6 Hajaligol 等建立的卷烟阴燃模型和吸燃模型<sup>[29]</sup>

阴燃模型	
烟草 热解 反应 方程	$V_i$ : 物种 i 的实时产率； $V_i^*$ : 物种 i 的总产率； $E_{oi}$ : 物种 i 的反应活化能； $\sigma_i$ : 物种 i 的标准偏差
焦炭 氧化 反应 方程	$\rho_c$ : 焦炭实时密度； $b,c,f$ : 常数； $r_0$ : 卷烟阴燃的辐射距离； $\rho_{0c}$ : 焦炭最大密度； $LBR_s$ : 卷烟阴燃线速度； $L_0$ : 卷烟燃烧中心的长度
气相 物质 传递 方程	$\rho$ : 气体实时密度； $V$ : 气流速度； $\mu$ : 气体粘性； $K$ : 渗透率； $C$ : 常数
吸燃模型	
烟草 热解 反应 方程	$V_i$ : 物种 i 的实时产率； $V_i^*$ : 物种 i 的总产率； $E_{oi}$ : 物种 i 的反应活化能
焦炭 氧化 反应 方程	$\rho_c$ : 焦炭实时密度； $b,c,f$ : 常数； $r_0$ : 卷烟阴燃的辐射距离； $\rho_{0c}$ : 焦炭最大密度； $LBR_p$ : 卷烟吸燃线速度； $L_0$ : 卷烟燃烧中心的长度
气相 物质 传递 方程	$\rho$ : 气体实时密度； $V$ : 气流速度； $\mu$ : 气体粘性

表 7 烟气中某些组分在主流烟气中的质量浓度<sup>[29]</sup>

产物	质量浓度 (wt.%)	
	计算值	实验值
O <sub>2</sub>	16.4	13
CO <sub>2</sub>	10.6	12.8
CO	5.0	4.0
乙醛	1.0	2.0



图 2 CO 递送量随抽吸口数的变化<sup>[29]</sup>

### 3 结语

综上所述, 经过几十年的深入研究, 技术人员已经基本把握了在卷烟燃烧过程中烟草成分的变化对烟气组成的影响, 对卷烟的燃烧过程有了较理性的认识, 建立了几种卷烟燃烧的数学模型。但是目前的卷烟燃烧模型还都相对片面的, 仅能模拟卷烟燃烧的某个反应或者某个类型, 并且还有一些模型并未将质量, 能量和动量传递以及其他变量对卷烟燃烧的影响考虑进去, 因而未能真正地模拟实际卷烟的燃烧过程。

随着数值计算技术的发展和卷烟燃烧过程的深入研究, 考虑到吸烟对烟民以及二手烟人群健康的影响, 建立全面系统的卷烟燃烧模型, 同时考虑各种卷烟材料的特性与可能添加剂(催化剂或者吸附剂), 可为烟草的加工工艺以及低焦油卷烟的配方设计提供量化依据, 有助于提高国内卷烟的设计和水平。

### 参考文献

- [1] Baker R R, Coburn S, Liu C. The pyrolytic formation of formaldehyde from sugars and tobacco[J]. J Anal Appl Pyrol, 2006, 77: 12-21.
- [2] Paine J B, Pithawalla Y B, Naworal J D. Carbohydrate pyrolysis mechanisms from isotopic labeling: Part 2. The pyrolysis of d-glucose: General disconnection analysis and the formation of C1 and C2 carbonyl compounds by electrocyclic fragmentation mechanisms[J]. J Anal Appl Pyrol, 2008, 82: 10-41.
- [3] Paine J B, Pithawalla Y B, Naworal J D. Carbohydrate pyrolysis mechanisms from isotopic labeling: Part 3. The Pyrolysis of d-glucose: Formation of C3 and C4 carbonyl compounds and a cyclopentenone isomer by electrocyclic fragmentation mechanisms[J]. J Anal Appl Pyrol, 2008, 82: 42-69.
- [4] Baker R R. The generation of formaldehyde in cigarettes--Overview and recent experiments [J]. Food Chem Toxicol, 2006, 44: 1799-1822.
- [5] Czegeny Z, Blazso M, Varhegyi G, et al. Formation of selected toxicants from tobacco under different pyrolysis conditions [J]. J Anal Appl Pyrol, 2009, 85: 47-53.
- [6] Baker R. Product formation mechanisms inside a burning cigarette

- [J]. Prog Energy Combust Sci, 1981, 7: 135-153.
- [7] Muramatsu M. Studies on the transport phenomena in naturally smoldering cigarette [R]. Japan Tobacco Monopoly Research Report, 1981, 123: 9-77.
- [8] Baker R R. Contributions to the draw resistance of a burning cigarette[J]. Beit Tabak Int, 1975, 8: 124-131.
- [9] Senneca O, Chirone R, Salatino P, et al. Patterns and kinetics of pyrolysis of tobacco under inert and oxidative conditions [C]. European Combustion Meeting, 2005.
- [10] Leach S V, Rein G, Ellzey J L, et al. Kinetic and fuel property effects on forward smoldering combustion [J]. Combust Flame, 2000, 120: 346-358.
- [11] Chen P. A Mathematical Model of Cigarette Smoldering Process [J]. Beit Tabak Int, 2002, 20: 165-271.
- [12] Yi S C, Hajaligol M R. Product distribution from the pyrolysis modeling of tobacco particles [J]. J Anal Appl Pyrol, 2003, 66: 217-234.
- [13] Blasi D C. Modeling and simulation of combustion processes of charring and non-charring solid fuels [J]. Prog Energy Combust Sci, 1993, 19: 71-104.
- [14] Rostami A, Murthy J, Hajaligol M R. Modeling of a smoldering cigarette[J]. J Anal Appl Pyrol, 2003, 66: 281-301.
- [15] Muller B H. Degradation kinetics of tobacco survey by fast thermogravimetry analysis [J]. J Anal Appl Pyrol, 1993, 25: 273-283.
- [16] Encinar J M, Beltran F L, Gonzalez J F, et al. Pyrolysis of maize, sunflower, grape and tobacco residues [J]. J Chemical Technol Biotechnol, 1997, 70: 400-410.
- [17] Avni E, Coughlin R W, Solomon P R, et al. Mathematical modelling of lignin pyrolysis [J]. Fuel, 1985, 64: 1495-1501.
- [18] Varhegyi G, Czegeny Z, Jakab E, et al. Tobacco pyrolysis. Kinetic evaluation of thermogravimetric-mass spectrometric experiments [J]. J Anal Appl Pyrol, 2009, 86: 310-322.
- [19] Bassilakis R, Carangelo R M, Wojtowicz M A. TG-FTIR analysis of biomass pyrolysis[J]. Fuel, 2001, 80: 1765-1786.
- [20] Wojtowicz M A, Bassilakis R, Smith W W, et al. Modeling the evolution of volatile species during tobacco pyrolysis[J]. J Anal Appl Pyrol, 2003, 66: 235-261.
- [21] Egerton A, Guggan K, Weinberg F J. The mechanism of smoldering in cigarettes [J]. Combust Flame, 1963, 7: 63-78.
- [22] Guggan K. Natural smolder in cigarette[J]. Combust Flame, 1966, 10: 161-164.
- [23] Jenkins R W, Frisch A F, Maekinnon J G, et al. Dynamic Measurement of the Axial Density of a Burning Cigarette[J]. Beit Tabak Int, 1977, 9: 67-71.
- [24] Baker R R. Combustion and thermal decomposition regions inside a burning cigarette[J]. Combust Flame, 1977, 30: 21-32.
- [25] Moussa N A, Toong T Y, Garris C A. Mechanism of smoldering of cellulosic materials[C]// Sixteenth symposium (international) on combustion, The Combustion Institute, Pittsburgh, 1977.
- [26] Muramatsu M, Umemura S, Okada T. A mathematical model of evaporation-pyrolysis process inside a naturally smoldering cigarette [J]. Combust Flame, 1979, 36: 245-262.
- [27] Rostami A, Murthy J, Hajaligol M. Modeling of a smoldering cigarette[J]. J Anal Appl Pyrol, 2003, 66: 281-301.
- [28] 江威, 李斌, 于川芳, 等. 卷烟阴燃过程温度场模拟 [C]// 烟草工艺学术研讨会论文集. 2006.
- [29] Saidi M S, Hajaligol M R, Rasouli F. Numerical simulation of a burning cigarette during puffing[J]. J Anal Appl Pyrol, 2004, 72: 141-152.
- [30] Yi S C, Hajaligol M R, Jeong S H. The prediction of the effects of tobacco type on smoke composition from the pyrolysis modeling of tobacco shreds [J]. J Anal Appl Pyrol, 2005, 74: 181-192.